

香菇复水过程中质地及风味变化

李倩钰¹, 曹雪慧^{1,*}, 嵇秋辰¹, 尤开艳¹, 梁志棠², 朱丹实¹

(1.渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013; 2.佛山市顺德区俊凌厨具有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要:为探究干香菇在复水过程中质地及风味的变化,本研究将干香菇于不同温度条件下进行恒温复水处理,采用电子舌、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术和激光扫描共聚焦显微镜等技术对复水阶段香菇的质地及风味特性进行分析。结果表明,不同复水温度和时间对复水香菇的质地、挥发性风味和滋味均有影响。其中,40℃复水30 min时的复水比达到平衡,鲜味强度值较高,但与其他组相比持水率有所下降,硬度和咀嚼性适中,弹性达到最大值,其菌盖褐变指数相对较高,但内褶褐变不明显,微观结构显示其菌丝较为舒展,剪切力适中。此外,40℃复水的香菇其抗氧化性高于100℃复水的香菇,可溶性蛋白损失更少,游离氨基酸含量更高并在30 min达到最大值。同时以含硫化物和酮类为主的特征风味物质得到较好保留,而100℃复水时特征性化合物含量下降严重。综上,复水过程中香菇的质地及风味会发生显著变化,将干香菇于40℃中复水30 min能够获得较好的品质。

关键词:香菇;复水性;微观结构;质地;鲜味物质

Changes in Texture and Flavor of Dehydrated Shiitake Mushroom during Rehydration

LI Qianyu¹, CAO Xuehui^{1,*}, ZHUO Qiuchen¹, YOU Kaiyan¹, LIANG Zhitang², ZHU Danshi¹

(1. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Foshan Shunde Junling Kitchenware Co. Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: This study was conducted in order to explore the changes in the texture and flavor of dried shiitake mushroom during rehydration. Dried shiitake mushroom was rehydrated at different constant temperatures (40 and 100 °C) for up to 180 min. An electronic tongue, headspace solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and laser scanning confocal microscopy (LSCM) were used to analyze the texture and flavor characteristics of shiitake mushroom during the rehydration process. The results showed that both rehydration temperature and time had significant effects on the texture, volatile flavor and taste of rehydrated mushroom. At 40 °C, the rehydration ratio almost reached equilibrium after 30 min, and the umami intensity was the second highest, but the water retention capacity decreased compared with all other groups. The hardness and chewiness of the 40 °C/30 min group were moderate, whereas the elasticity was the highest. The browning index of cap was the second highest, while the browning index of gills was not significantly different from that of any other group. Microscopic observation showed that the mycelium was unfolded and the shear force was moderate. In addition, the antioxidant activity of mushroom rehydrated at 40 °C was higher than that of mushroom rehydrated at 100 °C, the loss of soluble protein was less, and the content of free amino acids was higher and reached its maximum after 30 min. Furthermore, the characteristic flavor substances, mainly sulfur compounds and ketones, were well retained after rehydration at 40 °C, but decreased seriously at 100 °C. In conclusion, the texture and flavor of shiitake mushroom changed significantly during the rehydration process, and rehydration at 40 °C for 30 min resulted in better quality of shiitake mushroom.

Keywords: shiitake mushroom; rehydration properties; microstructure; texture; umami substances

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240627-190

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 03-0046-10

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2022YFD2100302)

第一作者简介: 李倩钰 (1999—) (ORCID: 0009-0007-3880-0889), 女, 硕士研究生, 研究方向为果蔬加工。

E-mail: 1610480925@qq.com

*通信作者简介: 曹雪慧 (1978—) (ORCID: 0000-0002-5434-0938), 女, 教授, 博士, 研究方向为果蔬冻藏加工。

E-mail: caoxuehuisnow@126.com

引文格式:

李倩钰, 曹雪慧, 嵇秋辰, 等. 香菇复水过程中质地及风味变化[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 46-55. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240627-190. <http://www.spkx.net.cn>

LI Qianyu, CAO Xuehui, ZHUO Qiuchen, et al. Changes in texture and flavor of dehydrated shiitake mushroom during rehydration[J]. Food Science, 2025, 46(3): 46-55. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240627-190. <http://www.spkx.net.cn>

香菇是一种常见的药食两用菌, 新鲜香菇子实体含水量在80%及以上^[1], 风味独特, 富含蛋白质、膳食纤维、多种维生素和矿物质等^[2]。采摘后由于复杂的生命活动, 会发生一系列生理生化反应^[3], 因此, 常温条件下保存期短, 并且极易发生褐变和腐烂变质等。而干制能够较大程度降低物料的含水量和水分活度, 使微生物难以生存, 从而达到长期贮藏的目的, 且干制后的物料质量减轻、体积减小, 能够极大的减少运输成本。在加工或食用前, 干制的香菇都需经历复水的过程才能被食用或再加工利用。因此, 复水过程中香菇组织状态、含水量、风味和颜色等都将影响最终产品品质。

在复水过程中, 香菇会逐渐变得饱满、柔软, 同时其风味和营养也得到一定程度的恢复, García-Segovia等^[4]探索了常压复水和真空复水方式对香菇质地和复水比的影响, 结果发现香菇复水的速率及品质与压力有关, 与常压复水相比, 在真空条件下香菇复水速率更快, 复水比更大。翁敏劼等^[5]研究了复水温度对香菇品质的影响, 结果表明复水温度为90~100℃时复水时间最短, 品质最佳, 而赵圆圆等^[6]发现复水温度为45℃左右时香菇具有较好的品质和风味。李文等^[7]对不同干燥处理(冷冻干燥、真空干燥、热风干燥、自然干燥)的香菇子实体复水性(复水温度为40℃, 恒温)进行了研究, 发现除冷冻干燥外, 其余干燥方式处理的子实体在50 min左右均达到了复水饱和。Apati等^[8]研究了平菇在相对湿度75%的环境下干燥后在不同条件下(25、55、80℃, 30、75、120 min)再复水的过程, 结果显示, 由于平菇本身厚度较薄, 使其完全吸收水分的速度更快, 于40℃条件下干燥的平菇样品在25℃条件下复水30 min即达到复水饱和, 并有较好的品质。可见, 香菇复水温度对其品质和风味的影响研究存在一定差异。目前有关干香菇的复水研究主要是针对于表观质构和特征性风味, 而复水过程中微观结构的变化、滋味变化和气味轮廓的变化鲜有报道, 且在复水过程中, 各指标变化的机制更需要深入研究。

根据本课题组前期初步实验的结果来看, 复水温度100℃组表现出良好的复水特性, 40℃组的风味和质地较好。基于此, 本实验选择高温和低温方式进行研究, 将香菇分别置于40℃和100℃恒温水浴中, 进一步研究复水过程对香菇持水率、色泽、营养、滋味及风味的影响, 特别针对复水比、质地、微观结构和特征性风味物质

(含硫化化合物和八碳化合物)之间的关联性进行分析, 探究引起品质变化的机理, 以期干香菇的工业化利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

干香菇购自辽宁省锦州市科技路农贸市场。挑选经热风干燥、大小一致、无破损和霉变的香菇。初始水分含量约9.14 g/g(干基)。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS)(均为分析纯) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; L-谷氨酸(色谱纯)、活性炭、考马斯亮蓝G-250、牛血清白蛋白全组分(均为分析纯) 北京索莱宝科技有限公司; 荧光增白剂28(生物级) 上海懋康生物科技公司; 茚三酮(分析纯) 上海沪试实验室器材股份有限公司。

1.2 仪器与设备

PL303电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; L9-PLUS紫外分光光度计 上海仪电分析仪器有限公司; Sorvall ST1R Plus冷冻离心机 美国赛默飞世尔科技公司; TMS-Pro质构仪 美国FTC公司; CR-400色差计 日本柯尼卡美能达公司; KQ-500DE超声波清洗机 昆山市超声仪器有限公司; GCMS-QP2020 NX气相色谱-质谱联用仪 日本岛津公司; STELLARIS 5激光共聚焦显微镜 德国徕卡公司; TS-500Z型电子舌 日本Insent公司。

1.3 方法

1.3.1 香菇的复水

取10 g干香菇置于烧杯中, 加入500 g相应温度(40℃或100℃)的纯水, 香菇上层加盖滤网, 防止香菇飘起, 整个过程将烧杯始终置于恒温水浴锅中保持复水温度恒定。于5、15、30、90、180 min时分别取出香菇, 用纸轻擦表面, 对其进行处理和测定。

1.3.2 香菇理化指标的测定

1.3.2.1 复水比测定

将干香菇在设定温度条件下复水不同时间, 捞出后

轻轻擦干表面后称质量。每组重复测定3次,结果取其平均值。复水比按式(1)计算:

$$\text{复水比} = \frac{m_f}{m_g} \quad (1)$$

式中: m_f 为复水后香菇的质量/g; m_g 为干香菇的质量/g。

1.3.2.2 持水率的测定

持水率能够反应待测物质对水分的保持能力,参照Xie Yong等^[9]的方法并进行改进。称取10.0 g复水后的香菇,用滤纸包好后置于已填充脱脂棉的50 mL离心管中7 000 r/min离心10 min。称取离心后的香菇质量,持水率按照式(2)计算:

$$\text{持水率}/\% = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中: m_1 为离心前样品质量/g; m_2 为离心后样品质量/g。

1.3.2.3 质构的测定

参考王闯^[3]的方法进行优化,取10个及以上大小相似的复水香菇进行测试,结果取平均值。全质构测试采用75 mm圆盘探头,测试速率60 mm/min,形变百分比30%,触发力0.38。剪切力采用单刀剪切探头,测试速率120 mm/min,回程速率150 mm/min,剪切距离63 mm。

1.3.2.4 色泽的测定

参考Kotwaliwale等^[10]的方法并进行改进,采用Hunter Lab模型对香菇菌盖和内褶的色泽进行测定。将复水完成的香菇取出,擦干表面水分,用色差计测定其亮度 L^* 值、红度 a^* 值、黄度 b^* 值,每次使用前用仪器自带白瓷板进行仪器标准化处理,每个香菇取3个点及以上进行测试,取平均值,褐变指数按式(3)计算:

$$\text{褐变指数} = \frac{100(x - 0.310)}{0.172} \quad (3)$$

$$\text{式中: } x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*}。$$

1.3.2.5 ABTS阳离子自由基清除率测定

取1.00 g香菇泥加入40 mL 60%乙醇溶液,将其置于60 °C、400 W功率的超声波仪中超声提取30 min,吸取0.8 mL样品提取液,加入8 mL ABTS阳离子自由基工作液,摇匀,30 °C恒温水浴5 min,于734 nm波长处测定其吸光度(A_1),以甲醇调零,以水替代样品作为空白对照并测定吸光度(A_2),按照式(4)计算ABTS阳离子自由基清除率^[11]:

$$\text{ABTS阳离子自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \times 100 \quad (4)$$

式中: A_1 为样品管吸光度; A_2 为空白对照管吸光度。

1.3.2.6 DPPH自由基清除率测定

吸取1.3.2.5节中的提取液,根据样品颜色深浅定量向试管中加入试剂及样品,加样结束后以甲醇为参比

溶液,于517 nm波长处测定吸光度,按照式(5)计算DPPH自由基清除率:

$$\text{DPPH自由基清除率}/\% = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100 \quad (5)$$

式中: A_0 为甲醇+DPPH自由基样品管吸光度; A_1 为样品管吸光度; A_2 为样品本底管吸光度。

1.3.2.7 可溶性蛋白质含量测定

将复水后的香菇捞出,根据复水液的初始体积对复水液中所损失的液体进行补齐,根据宋晓东^[12]的方法测定复水液中可溶性蛋白的含量。重复3次,取平均值,按照式(6)计算可溶性蛋白含量^[11]:

$$\text{可溶性蛋白含量}/(\text{mg/g}) = \frac{m' \times V}{V_s \times m \times 1\,000} \quad (6)$$

式中: m' 为根据标准曲线方程计算的蛋白质质量/ μg ; V 为样品提取液总体积/mL; V_s 为测定时所取样品提取液体积/mL; m 为样品质量/g。

1.3.2.8 微观结构观察

用激光共聚焦显微镜观察香菇复水过程中的微观结构变化,参照Bidhendi等^[13]和段瑞冰^[14]的方法并进行适当改进。将复水后的香菇擦干水分后置于-80 °C冰箱中快速冷冻,完全冷冻后的香菇取出迅速切片,贴于载玻片上,使用荧光增白剂28染色剂染色10 min,染色结束后将染色剂冲洗干净,使用吸水纸走多余水分,贴上盖玻片,避光放置,设置目镜 $\times 10$ 、物镜 $\times 20$,于488 nm激发波长处观察。

1.3.2.9 游离氨基酸含量测定

采用茚三酮比色法^[15]对复水香菇中游离氨基酸的含量进行测定。游离氨基酸含量按照式(7)进行计算:

$$\text{游离氨基酸含量}/(\mu\text{g}/100\text{ g}) = \frac{m_1}{m \times 1\,000} \times 100 \quad (7)$$

式中: m_1 为根据标准曲线方程计算的氨基酸质量/ μg ; m 为测定的样品溶液相当于样品的质量/g。

1.3.2.10 电子舌分析

使用TS-5000Z型电子舌进行分析,仪器配备AAE、CAO、CTO、COO和AE1共5个测试传感器,分别对鲜、酸、咸、苦、涩感进行测定。称取5.00 g复水后的香菇,加入150 mL蒸馏水,使用打浆机将其打浆90 s,5 000 r/min离心10 min,吸取20 mL上清液,加入80 mL蒸馏水,混匀后抽滤,4 °C保存待测。每个样品测定4次,取后3次结果进行分析^[16]。

1.3.2.11 挥发性化合物分析

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用仪对复水香菇中挥发性化合物进行分析。将复水后的香菇表面水分擦干,置于研磨机中,研磨15 s,精密称取研磨后的香菇3.00 g置于顶空瓶中,加盖。设置自动进样参数:40 °C平衡10 min,富集萃取30 min,于200 °C脱附3 min

进样。载气体积流量1.0 mL/min, 不分流进样, 进样口温度230 ℃。升温程序: 40 ℃保持3 min, 以5 ℃/min升至120 ℃后, 以10 ℃/min升至200 ℃, 保持10 min。电子电离源温度200 ℃, 进样口温度250 ℃, 质量扫描范围 m/z 25~500^[6]。

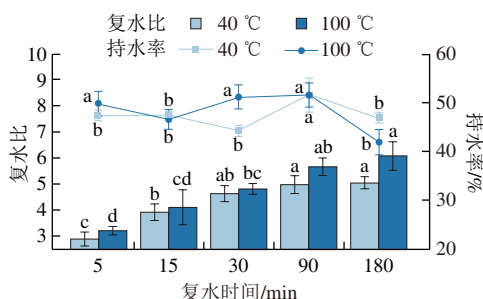
1.4 数据统计与分析

使用SPSS 23软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著; 使用Origin 2024 Pro软件绘图。

2 结果与分析

2.1 复水过程对香菇复水比与持水率的影响

复水比的大小能够衡量干制品复水能力的高低, 使用不同温度联合时间变化研究物质复水更能表征物质的复水过程及特性。由图1可知, 两种温度复水香菇的复水比均随着复水时间的延长而增加, 在0~15 min的过程中两种温度复水的复水比迅速上升, 主要是由于复水初期, 细胞空腔被迅速填充, 且由于相对高的温度使得高温赋予水分子更多动能, 水分更易进入空腔中。在整个复水过程中, 温度为40 ℃时, 复水比在约30 min时达到平衡, 之后几乎不再增加($P > 0.05$), 温度为100 ℃时, 复水比呈缓慢上升趋势, 在180 min之内未到达复水平衡, 90 min后持水率开始下降。



不同字母表示同一复水温度不同时间差异显著($P < 0.05$), 下同。

图1 复水过程香菇复水比和持水率的变化

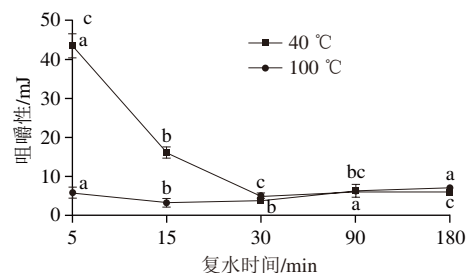
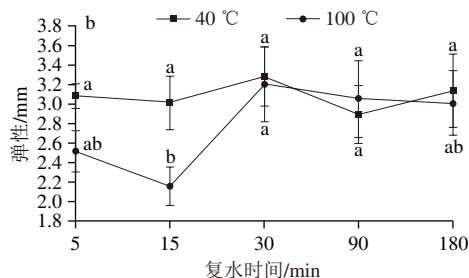
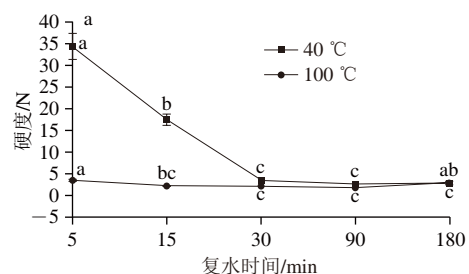
Fig. 1 Changes in rehydration ratio and water retention of mushroom during rehydration

持水率主要取决于不同成分与水的结合能力及物质的骨架结构, 在整个复水过程中, 持水率变化较小, 组间差异不大, 主要是由于香菇是多孔的纤维基质^[17], 新鲜香菇自身细胞壁的毛细管力和刚性是处于相互平衡的状态, 干制过程中由于温度升高等原因, 导致其细胞壁的刚性逐渐消失^[18], 细胞壁之间相互靠近并渐渐发生黏连, 而复水的过程能够平衡力与力之间的失衡现象, 但在复水过程中, 水分大量进入细胞空腔, 于一定

程度后将达到饱和, 此时更多水分只是简单地吸附在香菇的表层, 轻触表面就会有水渗出, 导致其复水比升高但持水率下降。但在复水至90 min时持水率发生上升, 并于180 min时持水率又再次下降。结合剪切力的结果分析, 由于长时间复水, 细胞壁骨架发生变化, 导致多糖结构之间的连接更加紧密, 能够截留住更多的水分^[19]; 而复水的进行并伴随高温促使香菇细胞壁的结构松散, 截留水分的能力下降, 使得其中的水更容易被挤压出, 同时高温会促使这个进程加快, 可见, 复水至180 min时, 于100 ℃复水的香菇持水率明显小于40 ℃复水的香菇。

2.2 复水过程对香菇质构的影响

硬度结合咀嚼性可反映复水后香菇的适口性。由图2a可知, 于40 ℃中复水的香菇其硬度在复水初期迅速下降, 在30 min后硬度变化变缓, 说明香菇内部结构趋于稳定, 其柔软程度达到了最高点。而于100 ℃中复水的香菇其硬度前15 min下降更为明显, 由于瞬间的高温, 香菇的内部结构迅速舒张, 并在15 min达到稳定, 考虑可能是蛋白的变性导致其细胞外层的葡聚糖被溶出, 细胞结构溃解、坍塌^[19-21]。



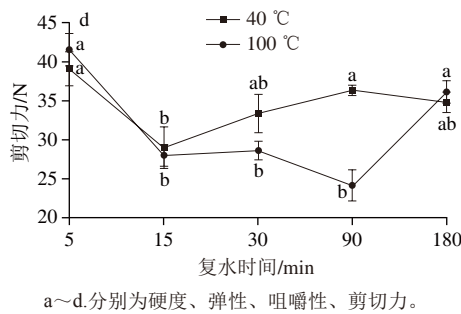


图2 复水过程香菇质构的变化
Fig. 2 Change in texture of mushroom during rehydration

弹性和咀嚼性是评价香菇口感的重要指标。由于香菇内部的纤维状结构，在整个复水过程中，40 °C复水的香菇其弹性无显著差异 ($P>0.05$)，且在整个复水过程中，同一时间点的弹性几乎均高于100 °C复水的香菇。而咀嚼性与硬度具有一定相关性，图2b、c中呈现的趋势表明，40 °C复水的香菇其咀嚼性在复水初期迅速下降，复水30 min后咀嚼性几乎不发生变化，而100 °C复水的香菇其咀嚼性在整个复水过程中呈缓慢下降的趋势，与硬度结果一致。这可能是由于硬度和咀嚼性之间呈正相关，两者在相同条件下变化趋势一致。

剪切力的变化能够反映物质的骨架变化，由图2d可知，两种温度复水的香菇其剪切力在复水初期都发生了下降，这与咀嚼性的前部分趋势相同。但是在复水中后期，咀嚼性无变化，剪切力反而整体上升，结合持水率和微观结构数据分析，主要是由于咀嚼是模拟人口腔牙齿与物质位移变化的过程，这期间很少涉及到“切断”的过程，而剪切是模拟人口腔牙齿咬断物质的运动，本质上是“切断”的过程。所以剪切力会更受物质微观结构的影响。García-Segovia等^[4]对常规复水和真空复水（5、15、20 min，30、40、50 °C）香菇的剪切力进行了分析，其结果与本研究相似，两种复水方式下香菇的剪切力均在测试时间内发生了下降，而常规复水更为明显。

香菇细胞壁含有大量的香菇多糖，其中包括了香菇β-葡聚糖、甘露糖和几丁质，β-葡聚糖是细胞壁的骨架并在水中呈刚性三螺旋结构^[20,22]，以β-葡聚糖为主体，细胞壁的多糖之间的交联有3种形式，正是因为细胞壁各组分之间相互交联和应力平衡保持了细胞壁的弹性和骨架^[22]。但细胞壁组成和交联以及应力的变化同样也会导致细胞骨架的变化。几丁质在细胞壁中占比不高，但其与β-葡聚糖交联形成的细胞骨架却是决定细胞壁物理性质的重要因素，在食用菌中，几丁质与β-葡聚糖和蛋白质形成复杂的纤维骨架网络结构，并由于几丁质、葡聚糖和蛋白质能够相互交联，葡聚糖-几丁质复合物具有良好的吸附性和生物相容性从而加固细胞壁的骨架，并将水分吸收

并截留于中层和内层，进一步解释了香菇在复水过程中其持水率（图1）和剪切力（图2d）升高的原因^[23]。

2.3 复水过程对香菇色泽的影响

褐变反应是促使干制品变色的一个主要原因，香菇干制过程中的褐变主要是美拉德反应造成的非酶促褐变，脱水干制时高温和残余水分中反应基团的浓度对美拉德反应有促进作用。如表1所示，40 °C复水的香菇菌盖L*值在复水5 min后持续高于100 °C复水的香菇盖，并于30 min达到亮度峰值，40 °C复水的香菇菌盖褐变指数与a*和b*值在整个复水过程中呈现相同趋势，均为先升高（5~30 min）后整体降低（30~180 min）（ $P<0.05$ ），并高于同时间100 °C复水的香菇，主要是由于亮度提升的同时其红度和黄度也在上升，造成总褐变指数的上升。内褶部分的亮度结果与菌盖部分相似，40 °C复水的香菇内褶亮度在同一时间始终高于100 °C复水香菇，褐变指数始终低于100 °C，但40 °C内褶的褐变指数并无显著差异（ $P>0.05$ ）。Kotwaliwale等^[10]研究也得到相似结果，这主要是由于复水过程中会有菌盖中褐色物质的溶解，使其附着于内褶上，但内褶本身的亮度较高，使得有轻微的亮度下降或褐变就非常明显。

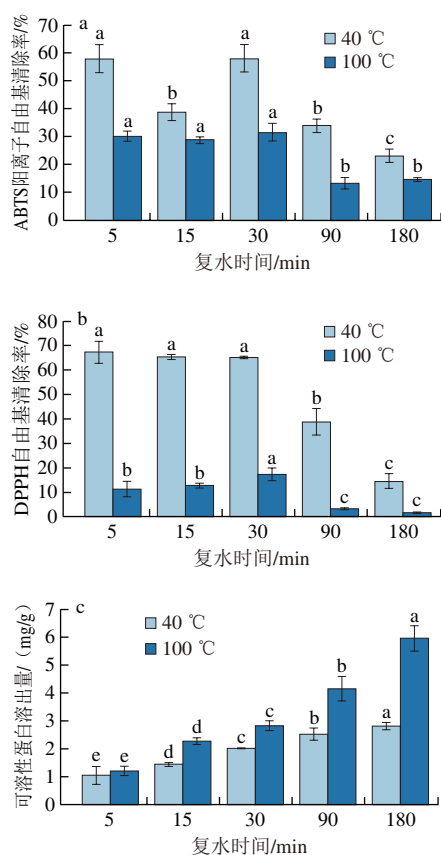
表1 复水过程香菇色泽的变化
Table 1 Color change of mushroom during rehydration

处理条件	菌盖				内褶	
	L*	a*	b*	褐变指数	L*	褐变指数
40 °C, 5 min	28.60±3.31 ^{ac}	8.61±0.28 ^{ab}	12.32±0.84 ^{ab}	75.91±6.79 ^{ab}	70.65±3.68 ^{ab}	35.73±3.38 ^{ab}
40 °C, 15 min	31.65±3.10 ^{ab}	11.61±1.00 ^{ab}	18.25±1.45 ^{ab}	107.93±8.21 ^{ab}	70.90±5.45 ^{ab}	35.05±3.85 ^{ab}
40 °C, 30 min	33.05±3.60 ^{ab}	11.17±1.43 ^{ab}	18.96±1.22 ^{ab}	105.72±10.84 ^{ab}	70.32±3.22 ^{ab}	33.36±4.03 ^{ab}
40 °C, 90 min	28.50±2.76 ^{ac}	8.00±0.30 ^{ab}	11.83±0.76 ^{ab}	72.16±6.59 ^{ab}	68.86±2.22 ^{ab}	33.92±3.08 ^{ab}
40 °C, 180 min	28.80±3.17 ^{bc}	8.63±0.21 ^{ab}	13.21±1.20 ^{ab}	80.95±6.59 ^{ab}	69.26±3.73 ^{ab}	32.59±3.53 ^{ab}
100 °C, 5 min	30.13±2.08 ^{ab}	9.21±0.85 ^{ab}	14.91±1.00 ^{ab}	87.95±7.29 ^{ab}	68.46±2.42 ^{ab}	34.09±2.79 ^{ac}
100 °C, 15 min	25.97±1.73 ^{bc}	5.91±0.66 ^{bc}	9.73±0.93 ^{bc}	62.64±5.23 ^{bc}	65.15±5.50 ^{ab}	37.16±3.41 ^{abc}
100 °C, 30 min	26.56±1.75 ^{bc}	4.97±0.29 ^{bc}	9.05±0.21 ^{bc}	54.01±5.29 ^{bc}	58.40±5.53 ^{bc}	42.75±4.31 ^{ab}
100 °C, 90 min	25.78±1.86 ^{abc}	5.61±0.41 ^{bc}	10.12±0.53 ^{bc}	64.95±6.63 ^{bc}	63.20±3.52 ^{ab}	36.73±3.08 ^{abc}
100 °C, 180 min	24.77±2.01 ^{ac}	4.76±0.01 ^{bc}	8.84±0.64 ^{bc}	57.40±5.95 ^{bc}	59.36±4.46 ^{bc}	39.67±3.14 ^{ab}

注：小写字母不同表示同一温度不同时间差异显著（ $P<0.05$ ）；大写字母不同表示同一时间不同温度差异显著（ $P<0.05$ ）。

2.4 复水过程对香菇抗氧化活性及蛋白质溶出量的影响

香菇中因有麦角甾醇、可溶性糖等成分，使其具有抗氧化等作用，且香菇在干制过程中，由于美拉德反应使得干香菇所具有的抗氧化能力更佳^[24-25]，可以通过ABTS阳离子自由基和DPPH自由基的清除能力反映^[26-29]。由图3a、b可知，于40 °C复水的香菇其ABTS阳离子自由基、DPPH自由基的清除率均高于100 °C中复水的香菇，其中30 min后，两种温度复水香菇的自由基清除率均发生显著下降（ $P<0.05$ ），主要是由于高温及长时间的复水，导致能够产生生理活性作用的多糖以及蛋白溶于复水溶液中，这一点从图3c能够得到验证。



a~c. 分别为ABTS阳离子自由基清除率、DPPH
自由基清除率、可溶性蛋白溶出量变化。

图3 复水过程香菇抗氧化活性及蛋白溶出量变化

Fig. 3 Changes in antioxidant activity and protein dissolution of mushroom during rehydration

香菇中含有多种功能性蛋白,在其复水过程中由于复水时间及温度等原因会造成“沥出现象”,通过测定复水液中可溶性蛋白的含量能间接反映香菇中可溶性蛋白相对保留程度。如图3c所示,两种温度条件下可溶性蛋白溶出量都呈现持续上升的趋势,但40 °C条件下溶出缓慢,5 min和180 min可溶性蛋白溶出极差仅为1.77 mg/g,且90 min之后溶出量变化较小(0.29 mg/g);而100 °C条件下溶出量和速率均较高,5 min和180 min可溶性蛋白溶出极差为4.73 mg/g,且组内各时间的溶出量均有显著差异($P < 0.05$),表明复水温度越高,随着复水时间的延长,溶出量急速增加,复水液中的可溶性蛋白质含量越多,这一结果与陈千祥等^[30]的结果一致。

2.5 复水过程对香菇微观结构的影响

荧光增白剂28是一种非特异性荧光染料,可结合细胞壁中的纤维素和几丁质^[31],从图4可明显看出,复水初期,细胞之间紧密连接,逐渐升温或延长复水时间其细胞之间的连接发生松动,骨架松散,于100 °C条件下复水的图像更为明显。其结果与质地结果相对应,由于葡聚

糖及几丁质的交联作用,复水中后期细胞壁骨架相较于复水中期更加紧密。

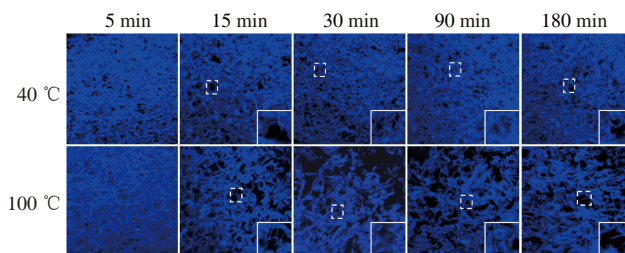


图4 复水过程香菇微观结构变化

Fig. 4 Changes in microstructure of mushroom during rehydration

2.6 复水过程对香菇风味的影响

2.6.1 游离氨基酸

香菇中含有丰富的氨基酸,如谷氨酸、缬氨酸和甘氨酸等^[32],本研究以谷氨酸为标准氨基酸制作标准曲线,对不同复水条件下香菇中的游离氨基酸含量进行定量分析。如图5所示,复水初期及后期两种温度复水的香菇其游离氨基酸含量相差较小,30 min时,于40 °C复水的香菇其游离氨基酸含量达到峰值,并显著高于其他时间组($P < 0.05$),之后开始缓慢下降,在100 °C复水的氨基酸含量在复水前期和中期虽具有显著变化($P < 0.05$),但5 min和180 min的含量变化极差仅为6.24 μg/100 g,而40 °C复水180 min和30 min含量变化极差为140.43 μg/100 g。主要是因为氨基酸含量与美拉德反应程度相关^[25],高温复水过程中,热敏性氨基酸发生转化、氧化或流失,而不充分的复水(即未达到复水平衡)又难以激发呈味氨基酸的风味^[33]。

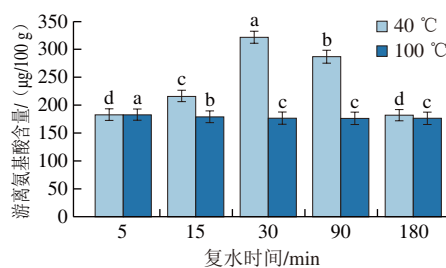


图5 复水过程香菇游离氨基酸含量变化

Fig. 5 Change in free amino acid content in mushroom during rehydration

2.6.2 电子舌分析结果

食物中的呈鲜味物质来源主要是氨基酸、核苷酸和鲜味寡肽^[34]。如图6a所示,各处理组之间的鲜味、咸味和丰富度滋味均具有差异。图6b显示主成分PC1的方差贡献率为44.5%,PC2的方差贡献率为32.9%,总方差贡献率大于70%,表明降维后的数据能够反映出原始数据的整体信息,贡献影响因子在图6b中以线段表示,其中越靠近样品所在坐标轴,说明影响因子对其影响越大,

40 ℃ 5 min组、40 ℃ 30 min组和100 ℃ 5 min组最接近X轴, 100 ℃ 90 min组和100 ℃ 180 min组相接近, 滋味相似; 100 ℃ 30 min组较其他组较远, 位于第3象限。40 ℃ 5 min组和40 ℃ 15 min组主要受咸味和鲜味的影响, 40 ℃ 5 min组、40 ℃ 90 min组、100 ℃ 90 min组和100 ℃ 180 min组主要受酸味影响较大。

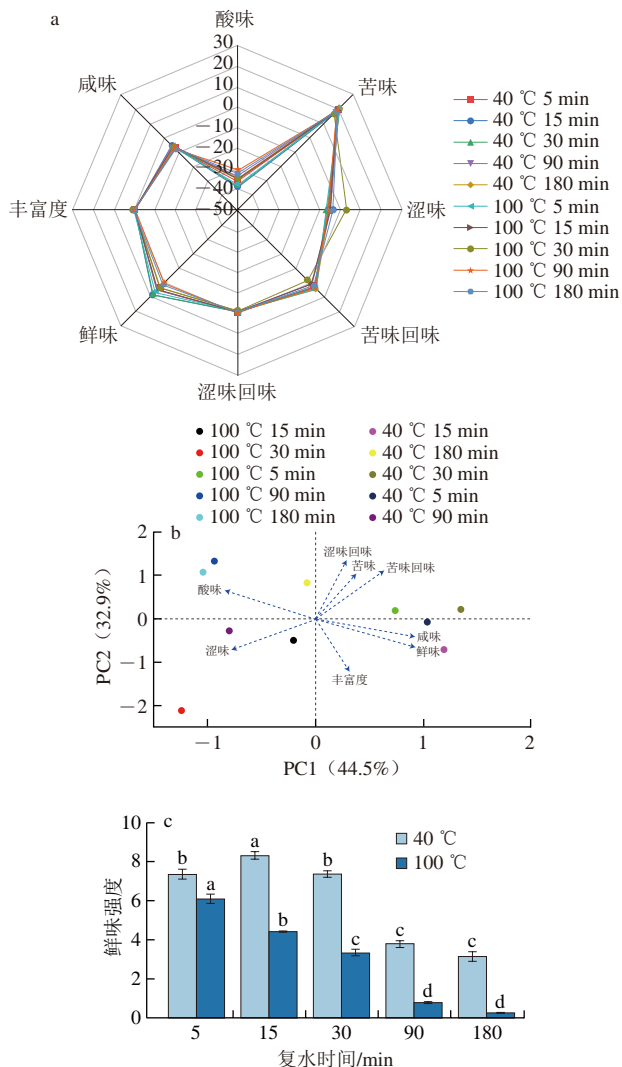


图6 复水过程香菇电子舌强度变化图(a)、主成分双标图(b)和鲜味强度图(c)

Fig. 6 Radar chart of electronic tongue taste intensity (a), principal component biplot (b) and umami intensity (c) of mushroom during rehydration

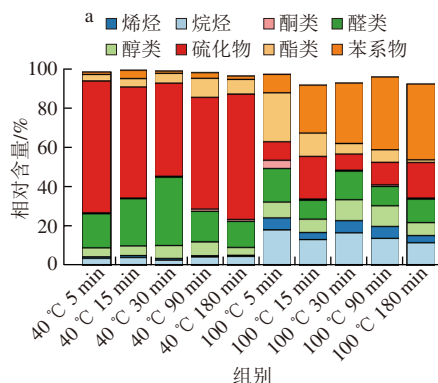
如图6c所示, 鲜味强度值在40 ℃复水的香菇中呈现先升高后降低的趋势, 于100 ℃复水的香菇中呈现逐渐降低的趋势 ($P < 0.05$), 且同一时间点, 40 ℃复水香菇的鲜味强度值均高于100 ℃复水香菇, 特别是15 min时, 40 ℃复水香菇的鲜味强度是100 ℃的1.88倍。这主要是由于复水前期, 水分未更多地进入香菇, 使得香菇中的呈鲜味物质没有过多的溶于复水液中, 并保留了部分干香菇的鲜味特性, 随着温度的升高及复水的进行, 鲜味

强度变化与刘常园^[35]采用煮制、复热方式对香菇汤品质影响的研究结果相似, 伴随着煮制的进行或温度的升高, 鲜味物质溶于复水剂中, 甚至有的鲜味物质发生了分解, 使得香菇中保留的呈鲜味物质强度发生下降, 这一结果与游离氨基酸结果相印证。

2.6.3 挥发性化合物分析结果

在干制过程中, 容易引起风味物质挥发, 通常干制品的风味物质比新鲜制品更少, 但是在干制的过程中会产生特殊的气味, 如热处理会带来硫味和焦香味等。香菇的风味成分较其他食用菌更为丰富且更特殊^[36], 并由于干制过程中发生美拉德反应和脂肪酸氧化裂解作用, 使得干香菇的风味不同于鲜香菇^[37]。鲜香菇中和完全干制的干香菇中有俗称的“霉臭味”, 没有香菇独特的气味, 但干香菇复水后其特征性风味会释放出来。

香菇的风味物质经气相色谱-质谱分析, 各组分质谱经计算机NIST谱库检索, 检测出123种挥发性风味化合物, 对复水过程香菇挥发性风味物质进行分类及含量变化分析, 结果如图7a所示, 其中烷烃类25种、烯烃类7种、醇类24种、醛类23种、酮类7种、酮类12种、硫化物12种、酯类7种、苯系物17种。干香菇中含硫化合物含量较高, 因香菇在焙烤及干制过程中会造成氨基酸和肽类物质的降解以及美拉德反应等, 导致产生大量的挥发性化合物^[38-39]。40 ℃复水香菇的主要挥发性成分为含硫化合物, 其次是醛类, 而100 ℃复水的香菇其硫化物含量较低, 主要挥发性成分为苯系物(图7a)。八碳含硫化合物主要是由前体物质香菇酸于谷氨酸转氨酶的作用下产生的二硫杂环丙烷中间体聚合而成^[40], 其中香菇精是香菇的主要风味物质之一, 由于其易挥发性和高温易分解性, 导致其在高温条件下复水含量较低。香菇精在高温中易分解为具有洋葱气味的二甲基二硫和二甲基三硫, 随着复水时间的延长和温度的升高, 香菇精的含量逐渐下降, 二甲基二硫和二甲基三硫的含量随之增加。3-甲硫基丙醛具有焦香味^[41], 于40 ℃复水时含量较大, 而于100 ℃复水时含量较小甚至无检出, 说明其也具有高温不稳定性。



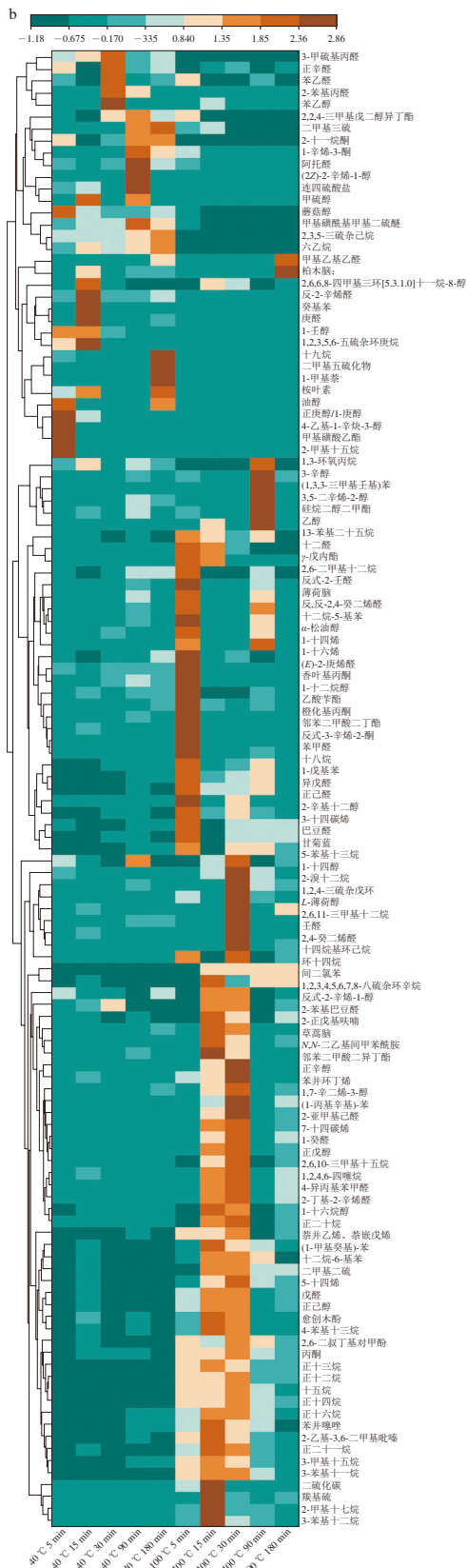


图7 复水过程香菇挥发性化合物相对含量变化堆积图(a)及
相对含量聚类热图(b)

Fig. 7 Stacked column chart of changes (a) and clustering heatmap (b) of
relative contents of volatile compounds in mushroom during rehydration

醇类化合物通常对美拉德反应体系风味的香气贡献较小,直链醇风味阈值较高,相对的气味会较弱,但随着碳链的增长其气味也会增强,对复水过程中香菇挥发性化合物进行聚类分析,结果如图7b所示,八碳醇化合物也是香菇特征性风味物质之一,而其前体物质主要是不饱和脂肪酸,不饱和脂肪酸在有氧气存在时经过自身的脂肪氧合酶及氢过氧化物裂解酶等作用形成八碳化合物,由于热稳定性差和易氧化的特性,其在鲜香菇焙烤过程及干制过程中大量损失,所以于复水香菇中存在较少^[37]。蘑菇醇和3-辛醇的含量与温度相关,图7b结果表明随着复水温度的升高,其含量下降甚至未检出,这一结果与Luo Dongsheng^[42]和Hou Hui^[43]等的研究结果相似。香菇中八碳酮类化合物中占主导地位的是3-辛酮,但是3-辛醇易被氧化及高温分解挥发,在热风干制后的香菇中含量较少,所以在所有处理组中均无检出。

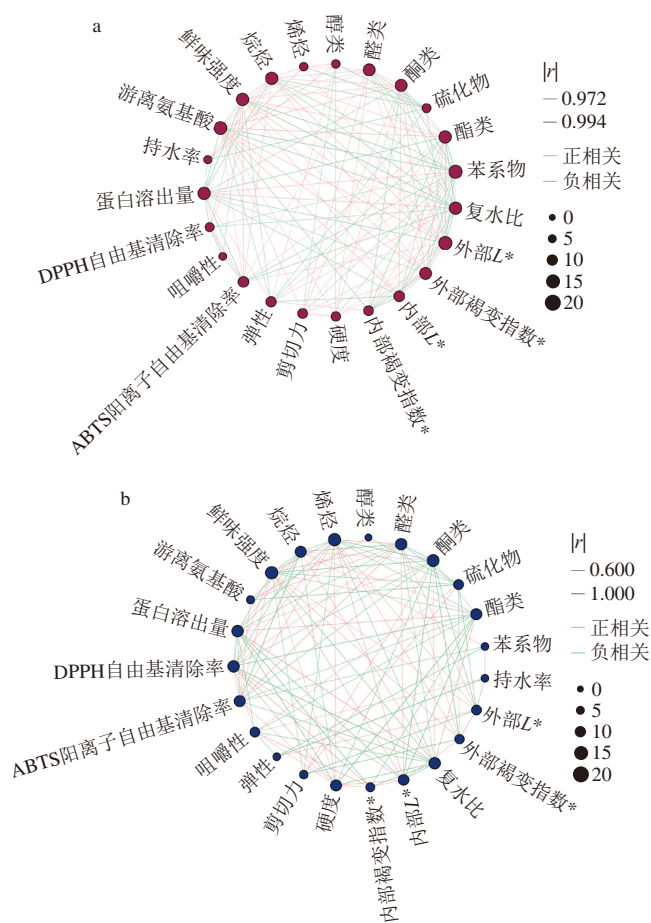
醛类化合物通常是由脂肪的自动氧化所生成,通常阈值较低,多数具有油脂香和清香等,对肉制品或烘培产品的风味形成具有一定的促进作用。很多Strecker醛(如苯甲醛和苯乙醛等)本身及其反应产物对于风味生成具有积极作用。苯甲醛是干香菇中最大的挥发性物质^[37],具有油脂味和鸢尾似香^[44];苯乙醛具有青草香气,图7b显示,苯甲醛在100 °C 5 min具有相对其他组更高的含量,苯乙醛在40 °C复水的香菇中普遍存在,于100 °C复水的香菇中仅在5 min和90 min时存在,5 min时可能是由于保留有干香菇的风味物质。低浓度的己醛能够提供清香,但浓度较高会产生类似腐臭味,图7b中显示100 °C相对40 °C复水具有较高的己醛含量。挥发性物质中的其他烃类、醛类、酮类及酯类等,主要是由脂肪酸氧化分解而生成,在香菇中能够协调风味,但是含量过高,则会造成风味的劣变。由图7a能够看出,烷烃的种类最多,其次是醛类和醇类。烃类化合物是氨基酸及脂肪氧化后期的产物,醛类物质除了来自不饱和脂肪酸的降解,还有的来自Strecker降解^[45]。100 °C复水的香菇,其烃类化合物含量明显高于40 °C复水的香菇,说明其劣变风味更为突出明显。

综上,于40 °C复水的香菇其风味较100 °C复水的香菇更浓郁,且根据各类化合物相对含量以及特征化合物的气味并结合电子舌结果综合分析,于40 °C中复水30 min的香菇在风味上优于其他各组。

2.7 相关性分析结果

为进一步明确品质和风味等指标之间的相关性,对40 °C和100 °C复水条件的结果(除微观结构外)进行了Spearman相关性分析。通过筛选 $|r| > 0.5$ 、 $P < 0.05$ 的数据绘制相关性网络,如图8所示,其中红色表示正相关,绿色表示负相关,无显著相关性的在网络图中没有体现。以40 °C为复水温度时,复水比与咀嚼性、硬度、内部 L^* 值和褐变指数以及鲜味强度等呈负相关,而与酮类含量和蛋白溶出量等呈负相关。但以40 °C为复水温度时,复

水比与内部褐变指数呈正相关,而与外部 L^* 值和褐变指数呈负相关。而在持水率方面,40℃为复水温度时,持水率与咀嚼性呈正相关,与弹性呈负相关,与其他质地指标无相关性;100℃为复水温度时,持水率与质地指标之间无相关性。上述相关性分析与品质研究结果一致,这是因为100℃为复水温度时,持水率的变化幅度相对质地较大,相互之间没有关联性。而风味与营养物质含量之间的关系相比质地与复水特性之间更为明显。两种温度条件下,鲜味强度均与自由基清除率呈负相关,而与蛋白溶出量呈正相关。



a、b.分别为40、100℃。

图8 相关性网络图

Fig. 8 Correlation network diagrams

3 结论

复水是干香菇被加工利用之前必须进行的一个处理过程,复水条件直接影响制品的品质和风味等。曾有学者研究了不同复水方式、复水温度以及不同产地香菇的复水品质,主要研究了复水过程的复水比、持水率和特征化合物等,缺乏对品质变化的原理分析和各指标之间的关联性分析。本研究对比分析了干香菇在两种常用的复水温度中进行不同时间复水后香菇的复水特性、质

地、色泽、滋味和风味的差异,结果表明,于100℃中对香菇进行复水,虽能够使其快速达到高的复水比,但其细胞壁骨架会被破坏,且香菇本身的营养物质会大量溶出,特征性风味物质含量和鲜味强度也相应降低,其加工性能受到严重破坏。而于40℃中复水的香菇其复水比和持水率在复水90 min达到峰值,而30 min之前,香菇的菌丝体未舒展开,未能达到可加工利用的程度,且其抗氧化性和鲜味感受强度在复水30 min后突然下降,氨基酸含量于30 min达到峰值。30 min在整个40℃复水过程中相当于一个“分界线”,在此时间后发生品质下降、风味劣变和营养损失等。综上,40℃ 30 min是干香菇于加工之前进行复水的良好复水条件。

参考文献:

- [1] LISERRE A M, LANDGRAF M, DESTRO M T, et al. Inhibition of *Listeria monocytogenes* by a bacteriocinogenic *Lactobacillus sake* strain in modified atmosphere-packaged Brazilian sausage[J]. Meat Science, 2002, 61(4): 449-455. DOI:10.1016/S0309-1740(01)00220-0.
- [2] DAWADI E, MAGAR P B, BHANDARI S, et al. Nutritional and post-harvest quality preservation of mushrooms: a review[J]. Heliyon, 2022, 8(12): e12093. DOI:10.1016/j.heliyon.2022.e12093.
- [3] 王闯. 不同采收期对香菇贮藏品质及八碳醇化合物合成的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022: 17. DOI:10.26919/d.cnki.gannu.2022.000179.
- [4] GARCÍA-SEGOVIA P, ANDRÉS-BELLO A, MARTÍNEZ-MONZÓ J. Rehydration of air-dried shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: comparison of conventional and vacuum water immersion processes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(2): 480-488. DOI:10.1016/j.lwt.2010.08.010.
- [5] 翁敏劫, 孔智伟, 陈君琛, 等. 复水与杀菌工艺对即食香菇品质的影响[J]. 福建农业学报, 2013, 28(3): 278-282. DOI:10.19303/j.issn.1008-0384.2013.03.016.
- [6] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 复水温度对香菇复水特性及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 181-188. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.02.022.
- [7] 李文, 杨焱, 陈万超, 等. 不同干燥方式对香菇含硫风味化合物的影响[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 71-79. DOI:10.16488/j.cnki.1005-9873.2018.04.012.
- [8] APATI G P, FURLAN S A, LAURINDO J B. Drying and rehydration of oyster mushroom[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2010, 53(4): 945-952. DOI:10.1590/s1516-89132010000400025.
- [9] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, et al. Mechanism of low-voltage electrostatic fields on the water-holding capacity in frozen beef steak: insights from myofilament lattice arrays[J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136786. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.136786.
- [10] KOTWALI WALE N, BAKANE P, VERMA A. Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1207-1211. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.12.033.
- [11] ZHANG J T, DONG Y S, NISAR T, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray powders[J]. Powder Technology, 2020, 372: 68-75. DOI:10.1016/j.powtec.2020.05.097.
- [12] 宋晓东. 不同复水方式对薇菜品质影响及动力学和作用机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 31-34; 45-52.

- [13] BIDHENDI A J, CHEBLI Y, GEITMANN A. Fluorescence visualization of cellulose and pectin in the primary plant cell wall[J]. Journal of Microscopy, 2020, 278(3): 164-181. DOI:10.1111/jmi.12895.
- [14] 段瑞冰. 粉脆质地莲藕细胞壁碱溶性多糖结构差异与流变学特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 35.
- [15] 胡京枝, 董小海, 余大杰. 紫外分光光度法测定含乳饮料中游离氨基酸含量[J]. 中国食品添加剂, 2007, 18(6): 164-166; 64. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2007.06.033.
- [16] 刘芹, 胡素娟, 崔俊, 等. 不同干燥温度对金针菇菇根挥发性特征和口感特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 104-113. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220316-175.
- [17] HU L N, BI J F, JIN X, et al. Microstructure evolution affecting the rehydration of dried mushrooms during instant controlled pressure drop combined hot air drying (DIC-HA)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 79: 103056. DOI:10.1016/j.ifset.2022.103056.
- [18] CEN H Y, LU R F, MENDOZA F, et al. Relationship of the optical absorption and scattering properties with mechanical and structural properties of apple tissue[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 30-38. DOI:10.1016/j.postharvbio.2013.04.014.
- [19] 邱阳. 联合干燥对香菇复水后持水性的影响与工艺优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 18; 22-28. DOI:10.27630/d.cnki.gzsky.2021.000301.
- [20] 许小娟, 徐慧, 刘青业, 等. 刚性 β -葡聚糖的结构与功能[C]//2015年全国高分子学术论文报告会论文集. 苏州, 2015: 33.
- [21] 刘艳琼. 灵芝中几丁质的分离表征及几丁质-葡聚糖复合物水凝胶制备[D]. 上海: 华东理工大学, 2021: 12. DOI:10.27148/d.cnki.ghagu.2021.000575.
- [22] 张明芳, 王金晶, 钮成拓, 等. 啤酒酵母细胞壁环境压力应答机制研究进展[J]. 生物工程学报, 2019, 35(7): 1214-1221. DOI:10.13345/j.cjb.180513.
- [23] QIU Y, BI J F, JIN X, et al. An understanding of the changes in water holding capacity of rehydrated shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) from cell wall, cell membrane and protein[J]. Food Chemistry, 2021, 351: 129230. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129230.
- [24] CHEN X M, KITTS D D. Correlating changes that occur in chemical properties with the generation of antioxidant capacity in different sugar-amino acid Maillard reaction models[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(6): C831-C837. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02215.x.
- [25] XU H N, ZHANG X M, KARANGWA E, et al. Correlating enzymatic browning inhibition and antioxidant ability of Maillard reaction products derived from different amino acids[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(12): 4210-4218. DOI:10.1002/jsfa.8295.
- [26] 何皎, 孙晓菲, 潘琳, 等. 五种香菇营养成分及其香菇多糖的抗氧化性评价[J]. 农产品加工, 2023(8): 56-60; 65. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2023.04.042.
- [27] 杨皓瑜, 程艳芬, 王胜男, 等. 香菇中麦角甾醇提取、表征及抗氧化、降胆固醇特性[J]. 食用菌学报, 2023, 30(2): 75-84. DOI:10.16488/j.cnki.1005-9873.2023.02.008.
- [28] SHARMA S K, GAUTAM N. Evaluation of nutritional, nutraceutical, and antioxidant composition of eight wild culinary mushrooms (higher basidiomycetes) from the Northwest Himalayas[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2016, 18(6): 539-546. DOI:10.1615/intjmedmushrooms.v18.i6.80.
- [29] JACINTO-AZEVEDO B, VALDERRAMA N, HENRÍQUEZ K, et al. Nutritional value and biological properties of Chilean wild and commercial edible mushrooms[J]. Food Chemistry, 2021, 356: 129651. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129651.
- [30] 陈千祥, 任文辉, 杨华, 等. 香菇复水工艺优化研究[J]. 农产品加工, 2017(18): 14-16. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2017.09.030.
- [31] TORTORELLI G, PETTOLINO F, LAI D H, et al. The cell wall polysaccharides of a photosynthetic relative of api complexans, *Chromera velia*[J]. Journal of Phycology, 2021, 57(6): 1805-1809. DOI:10.1111/jpy.13211.
- [32] LI B, KIMATU B M, PEI F, et al. Non-volatile flavour components in *Lentinus edodes* after hot water blanching and microwave blanching[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(Suppl 3): S2532-S2542. DOI:10.1080/10942912.2017.1373667.
- [33] QIU J G, LI H Y, LIU Y, et al. Changes in flavor and biological activities of *Lentinula edodes* hydrolysates after Maillard reaction[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137138. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.137138.
- [34] 俞铮, 葛小通, 张佳汇, 等. 食品中鲜味的来源及其评价方法[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 338-347. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210831-405.
- [35] 刘常园. 煮制、复热方式对香菇汤品质的影响及香菇汤产品货架期的预测[D]. 南京: 南京农业大学, 2020: 78. DOI:10.27244/d.cnki.gnjnu.2020.002039.
- [36] JIANG C P, DUAN X Y, LIN L, et al. A review on the edible mushroom as a source of special flavor: flavor categories, influencing factors, and challenges[J]. Food Frontiers, 2023, 4(4): 1561-1577. DOI:10.1002/fft2.263.
- [37] LIU Q, BAU T, JIN R X, et al. Comparison of different drying techniques for shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): changes in volatile compounds, taste properties, and texture qualities[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 164: 113651. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113651.
- [38] LIU Q, CUI X, SONG Z B, et al. Coating shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) with a polysaccharide from *Oudemansiella radicata* improves product quality and flavor during postharvest storage[J]. Food Chemistry, 2021, 352: 129357. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129357.
- [39] LIU Q, HU S J, SONG Z B, et al. Relationship between flavor and energy status in shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) harvested at different developmental stages[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(10): 4288-4302. DOI:10.1111/1750-3841.15904.
- [40] 王蓓, 韩兆盛, 杨智杰, 等. 6类常见食品中含硫化物风味特征及形成机理研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6): 13-25. DOI:10.12301/spxb202100689.
- [41] 郑杨. 芝麻香型白酒关键香气成分研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 65.
- [42] LUO D S, WU J H, MA Z, et al. Production of high sensory quality Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) by pulsed air-impingement jet drying (AID) technique[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128290. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128290.
- [43] HOU H, LIU C, LU X S, et al. Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis: influence of drying techniques[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111402. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111402.
- [44] YAMAMOTO T, INUI-YAMAMOTO C. The flavor-enhancing action of glutamate and its mechanism involving the notion of kokumi[J]. NPJ Science of Food, 2023, 7(1): 3. DOI:10.1038/s41538-023-00178-2.
- [45] ZANG M W, WANG L, ZHANG Z Q, et al. Changes in flavour compound profiles of precooked pork after reheating (warmed-over flavour) using gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry with chromatographic feature extraction[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(3): 978-987. DOI:10.1111/ijfs.14306.